

Der Welle-Teilchen-Dualismus

Lucca Anna Eisele, WS 14/15; Minh An Nguyen, WS 18/19

Gliederung

1	Wellen und Teilchen	1
1.1	Eigenschaften eines Teilchens	1
1.2	Eigenschaften von Wellen	2
2	Sowohl Welle als auch Teilchen?	4
2.1	Die Energie des Lichts	4
2.2	Wellen-Eigenschaften der Elektronen	5
2.3	Die de Broglie-Wellenlänge	6

Einstieg 1: Um sich in der Welt zurechtfinden zu können, verlassen sich die Menschen vor allem auf ihre Augen. Der Sehsinn ermöglicht die Wahrnehmung von Objekten in der Umgebung. Das klappt allerdings nur, wenn genügend Licht vorhanden ist. Das Licht wurde schon Mitte des 18. Jahrhunderts von Isaac Newton beschrieben: er war der Auffassung, das Licht bestünde aus sehr kleinen Teilchen, die er „Korpuskeln“ nannte. Seine „Korpuskel-Theorie“ wurde allerdings schon bald durch die „Wellen-Theorie“ abgelöst. Nach dieser Theorie bestünde das Licht aus Wellen, die sich im Raum ausbreiten.

Die Photonen-Theorie, welche im Jahre 1905 von Albert Einstein aufgestellt wurde, zeigte beim Licht jedoch wieder Teilchen-Charakter auf.

Die Eigenschaften von Teilchen und Welle widersprechen sich, dennoch scheinen sie beide für das Licht zuzutreffen.

Einstieg 2: Jedoch tritt der Welle-Teilchen-Dualismus nicht nur bei Licht auf, sondern auch bei Elektronen. Elektronen wurden historisch nur als Teilchen betrachtet, besitzen aber auch Wellen-Eigenschaften. Diese kann man mit dem Elektronenbeugungs-Experiment verifizieren. De Broglie postulierte daraufhin eine Hypothese über den Zusammenhang der Wellen- und Teilchen-Eigenschaften.

1 Wellen und Teilchen

1.1 Eigenschaften eines Teilchens

In der Natur-Wissenschaft stellt man sich die kleinsten Bestandteile von Objekten als sehr kleine, kugelförmige Teilchen vor. Dabei handelt es sich um Atome, Moleküle oder Elektronen. Die Teilchen können mit anderen Teilchen, gleicher oder anderer Natur, in Wechselwirkung treten. Sie können sich gegenseitig anziehen oder abstoßen.

Jedes Teilchen, egal welcher Größe, besitzt eine bestimmte **Masse** und eine **Ladung**. Die Ladung kann positiv, negativ oder neutral sein. Teilchen sind in ständiger Bewegung, selbst in Festkörpern liegt immer eine gewisse Eigen-Schwingung vor. Demnach besitzen die Teilchen immer eine bestimmte **Geschwindigkeit** mit der sie sich durch den Raum

bewegen, oder um eine Stelle schwingen. Die Geschwindigkeit von freien Teilchen im Raum kann sehr hoch sein. Ein Wasserstoff-Molekül bewegt sich beispielsweise mit einer Geschwindigkeit von 1.770 m/s fort. Doch egal wie schnell ein Teilchen wird, es kann sich zu einem Zeitpunkt „t“ immer an nur exakt einem Ort aufhalten. (Das kann man sich vorstellen wie eine Moment-Aufnahme von einem Läufer: egal wie schnell gerannt wird, zu dem Zeitpunkt, den das Bild einfängt, befindet sich der Läufer an genau einer Stelle.) Teilchen sind also **ortsbeschränkt**.

Newton führte ein sehr einfaches Experiment durch: Er ließ einen gebündelten Licht-Strahl auf eine reflektierende Oberfläche (Bsp.: eine Spiegel) treffen. Das Licht wurde von der reflektierenden Oberfläche zurückgeworfen, und zwar im selben Winkel, in dem es eingetroffen war. Der Einfallswinkel des Lichts entsprach also seinem Ausfallswinkel.

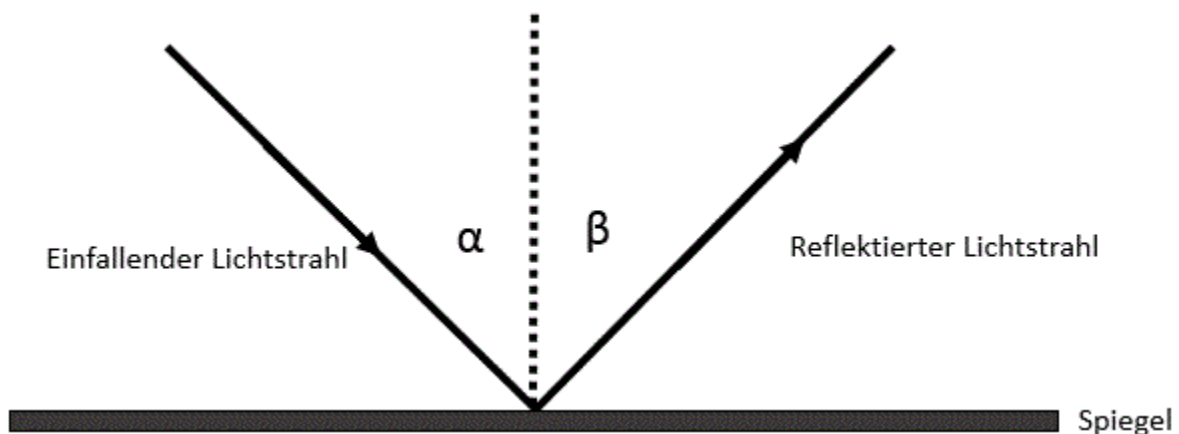


Abb. 1: Einfallswinkel ist gleich Ausfallswinkel

Dieser Befund brachte Newton dazu, das Licht als kleine Teilchen zu beschreiben. Da die Licht-Strahlen, ähnlich wie ein Ball, von der reflektierenden Oberfläche zurückgeworfen wurden.

1.2 Eigenschaften von Wellen

Wellen sind periodische Schwingungen, die sich ohne eine örtliche Beschränkung im Raum ausbreiten. Eine Welle kann an verschiedenen Stellen mit verschiedener Intensität wirken. Wellen beeinflussen sich außerdem gegenseitig dieses Phänomen wird als **Interferenz** bezeichnet.

Man kann sich dies vorstellen, wie Wasser-Wellen auf einem Teich. Wenn zwei kleine Wellen-Berge aufeinander treffen, erzeugen sie gemeinsam einen großen Wellen-Berg. Dasselbe passiert, wenn zwei kleine Wellen-Täler aufeinander treffen: sie erzeugen gemeinsam ein tieferes Wellen-Tal. Wellen können sich also gegenseitig verstärken. Ebenso können sich zwei gegenläufige Wellen auch auslöschen: sollte ein Wellen-Berg auf ein Wellen-Tal mit gleicher Amplitude treffen, so löschen sich die beiden Wellen gegenseitig aus und die Wasser-Oberfläche erfährt keinen Ausschlag mehr.

Das Doppelspalt-Experiment

Das Experiment wurde 1804 von Thomas Young durchgeführt. Es löste die Vorstellung des Lichts von Newton ab.

Der Versuchsaufbau sah folgendermaßen aus: elektromagnetische Strahlen wurden von einer Quelle ausgesendet. Sie trafen auf eine Blende, in der sich zwei Schlitze befanden. Hinter der Blende befand sich ein Schirm, der die auftreffenden Strahlen registrierte und später aufzeigen konnte, wo wie viele Licht-Strahlen aufgetroffen waren.

Wenn man vom Teilchen-Charakter des Lichts ausgeht, so ergibt sich folgender Befund: Die Teilchen, prallen entweder auf die Blende, oder können durch einen der Spalten gelangen und auf den dahinter liegenden Schirm auftreffen. In diesem Fall würde man auf dem Schirm ein Muster von zwei Streifen, entsprechend der Schlitze in der Blende, erwarten.

Dieses Ergebnis lieferte der Versuch allerdings nicht. Auf dem Schirm war ein Streifen-Muster zu erkennen:

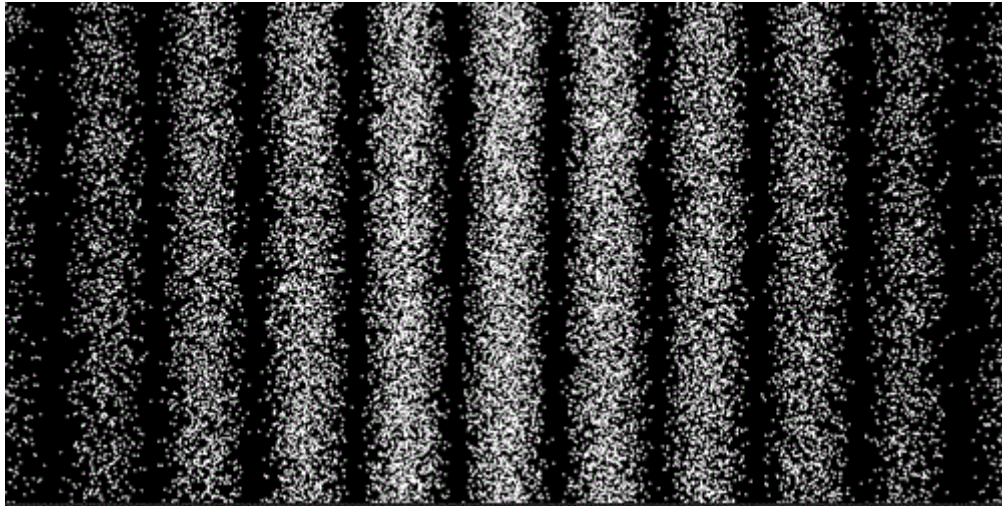


Abb. 2: exemplarisches Ergebnis des Doppelspalt-Experimentes [1]

Dieses Ergebnis lässt sich nur damit erklären, dass das Licht sich wie eine Welle verhält. Demzufolge treten im Experiment Interferenz-Effekte auf, welche die Streuung des Lichts erklären.

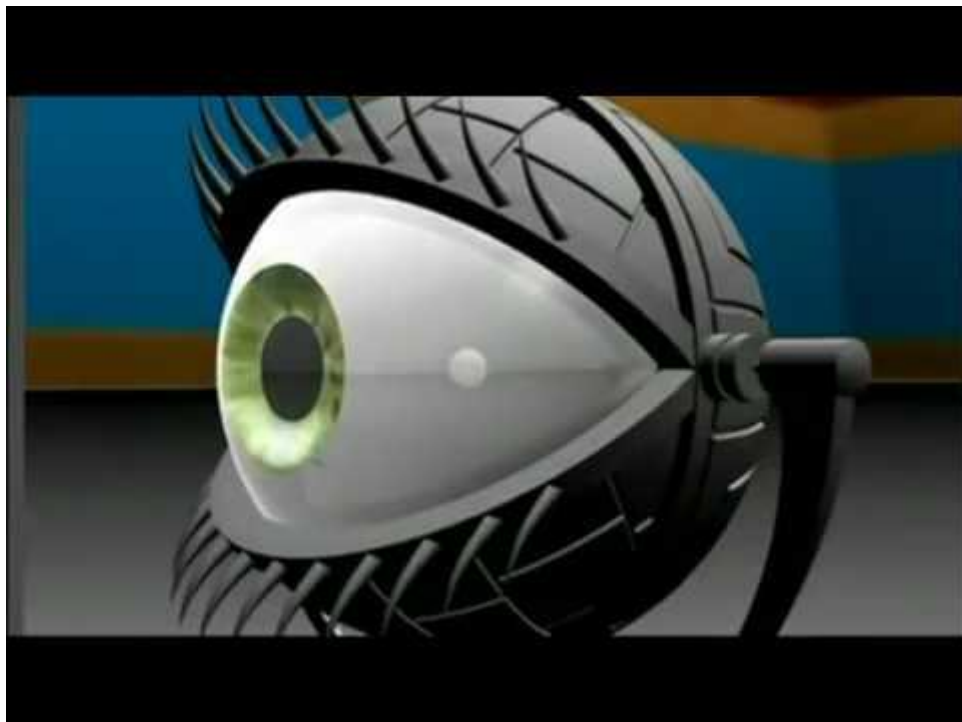


Abb. 3: Welt der kleinsten Teilchen, Doppelspalt-Experiment [6]

2 Sowohl Welle als auch Teilchen?

2.1 Die Energie des Lichts

Obwohl sich die Eigenschaften von Wellen und Teilchen zu widersprechen scheinen, zeigen Quanten-Objekte (z. B. das Licht) beide. Um diesen Widerspruch im Falle des Lichts zu begegnen, benutzt man die Erkenntnis des **Welle-Teilchen-Dualismus**. Je nach Betrachtungsweise werden entweder die Wellen- oder die Teilchen-Eigenschaften des Lichts beobachtet und zur Erklärung des jeweiligen Befunds eingesetzt.

Das Licht-Teilchen wird als **Photon** bezeichnet. Photonen besitzen keine Masse (hier wird der erste Widerspruch zur Teilchen-Theorie deutlich!). Sie bewegen sich allerdings im Raum und erfahren dabei einen Impuls „p“, der durch die Geschwindigkeit und die Masse des jeweiligen Teilchens gekennzeichnet ist.

$$\vec{p} = m * v$$

Ein Photon, welches sich bewegt, besitzt also eine Masse, da es einen Impuls erfährt. Anderenfalls stünde es still. Die Masse eines Photons kann mithilfe folgender Formel berechnet werden:

$$m_{\text{Photon}} = \frac{h * f}{c^2}$$

„h“ bezeichnet dabei eine Konstante, das Planck'sche Wirkungs-Quantum „h“, es beträgt etwa $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J*s}$.

„c“ steht für die Licht-Geschwindigkeit, also die Strecke, die das Licht binnen einer Sekunde zurücklegt, das sind $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

„f“ bezeichnet die Frequenz des jeweiligen Lichts und kann über folgende Formel berechnet werden:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

„λ“ beschreibt die Wellenlänge, welche vom menschlichen Auge (im für uns sichtbaren Bereich) als jeweilige Farbe des Lichts wahrgenommen werden kann.

Wenn die Masse des Photons berechnet wurde, kann mithilfe der Licht-Geschwindigkeit auch die Energie des Photons bestimmt werden:

$$E = m * c^2$$

Die Frequenz (eine typische Wellen-Eigenschaft) kann zur Berechnung der Masse eines Photons (die Masse ist eine typische Teilchen-Eigenschaft) herangezogen werden. Wird in der Formel zur Berechnung der Energie eines Photons, das Symbol der Masse „m“ als Formel ausgeschrieben, so erhält man folgenden Term:

$$\frac{h * f}{c^2} = \frac{E}{c^2}$$

Der Term kann folgendermaßen umgestellt werden, sodass die Licht-Geschwindigkeit im Quadrat herausgekürzt werden kann:

$$E = c^2 * \frac{h * f}{c^2}$$

Die Energie des Lichts „E“ kann durch zwei unterschiedliche Terme ausgedrückt werden:

$$E = h * f$$

und

$$E = m * c^2$$

Die Energie des Lichts kann also sowohl mithilfe der Teilchen-Eigenschaft **Masse** als auch mithilfe der Wellen-Eigenschaft **Frequenz** angegeben werden. Hier vereinen sich zwei der auf den ersten Blick widersprüchlichen Eigenschaften.

2.2 Wellen-Eigenschaften der Elektronen

Obwohl Elektronen zunächst als Teilchen aufgefasst wurden, besitzen diese auch Wellen-Charakter. Die wird im Elektronenbeugungs-Experiment sichtbar.

Die Elektronen-Beugung

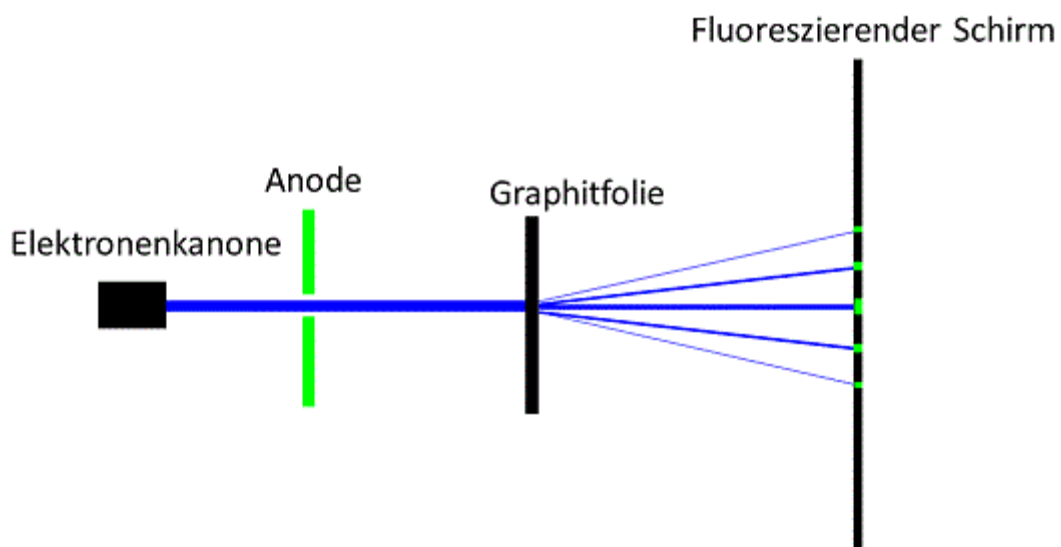


Abb. 4: Aufbau des Elektronenbeugungs-Experiments [11]

Bei der Elektronen-Beugung wird zunächst ein Elektronen-Strahl mit Hilfe einer Elektronen-Kanone erzeugt. Dieser wird mit einer Anode fokussiert und die Elektronen werden auf eine einheitliche Geschwindigkeit beschleunigt. Dabei werden die Elektronen unterschiedlich abgelenkt. Dies wird durch einen fluoreszierenden Schirm sichtbar gemacht. Man beobachtet ein typisches Beugungs-Muster, welches man für Wellen erwarten würde (s. Abb. 5).

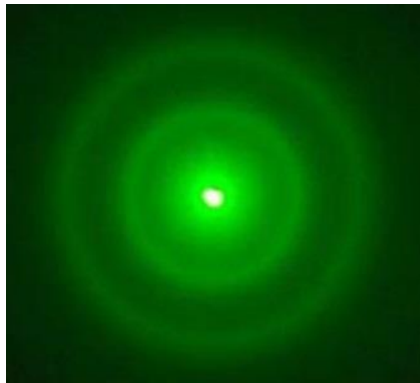


Abb. 5: Beugungs-Muster [12]

Dieses Experiment nutzt die Teilchen- und Wellen-Eigenschaften der Elektronen. Der Teilchen-Charakter wird am Anfang genutzt um einen gebündelten, kohärenten Strahl zu erhalten, während der Wellen-Charakter das Beugungs-Muster erzeugt.

2.3 Die de Broglie-Wellenlänge

De Broglie postulierte folgende Hypothese zum Zusammenhang von Wellenlänge „ λ “ und Impuls „ p “ eines Teilchens mit dem Planck'schen Wirkungs-Quantum „ h “:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Dieser Zusammenhang kann mit dem Elektronenbeugungs-Experiment verifiziert werden. Dazu wird zunächst die theoretische Wellenlänge nach de Broglie bestimmt. Dafür wird der Impuls eines Elektrons benötigt. Den Impuls erhält man auch hier mit folgender Formel:

$$\vec{p} = m * v$$

Zur Bestimmung des Impuls „ p “ eines Elektrons wird daher die Geschwindigkeit „ v “ dieses Elektrons benötigt. Die Geschwindigkeit „ v “ wird über die kinetische Energie mit Hilfe der Ruhe-Masse „ m “ des Elektrons berechnet:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} * m * v^2$$

Dabei gilt wegen der Energie-Erhaltung, dass ein Elektron soviel kinetische Energie besitzt wie es an Beschleunigungs-Energie erhalten hat. Diese Energie wird durch das Produkt der Elementar-Ladung „ e “ und der Beschleunigungs-Spannung „ U “ berechnet:

$$E_{\text{bes}} = eU$$

Durch Gleichsetzen und Umformen erhält man folgenden Ausdruck für die Geschwindigkeit eines Elektrons:

$$v = \sqrt{\frac{2 * e * U}{m}}$$

Eingesetzt in die Gleichung von de Broglie folgt für die Wellenlänge eines Elektrons folgende Formel:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m}}} = \frac{h}{\sqrt{2 \cdot m \cdot e \cdot U}}$$

Die experimentell bestimmte Wellenlänge wird über die Bragg-Bedingung für konstruktive Interferenz bestimmt:

$$2 \cdot d \cdot \sin(a_k) = k \cdot \lambda$$

Der Netzebenen-Abstand „d“ in der Graphit-Folie wird vom Hersteller geliefert. Bei der Betrachtung des k-ten Beugungsringes wird also noch der dazugehörige Winkel „a_k“ benötigt. Dieser lässt sich trigonometrisch mit dem Radius „r_k“ des k-ten Beugungsringes und dem Abstand „l“ zwischen dem Schirm und der Folie bestimmen:

$$\tan(2a_k) = \frac{r_k}{l}$$

Es folgt nun folgende Gleichung für die experimentell bestimmte Wellenlänge:

$$\lambda = \frac{2 \cdot d \cdot \sin\left(\frac{1}{2} \cdot \tan^{-1}\left(\frac{r_k}{l}\right)\right)}{k}$$

Vergleicht man die experimentell bestimmten mit theoretisch berechneten Wellenlängen, so kann man de Broglie's Hypothese verifizieren.

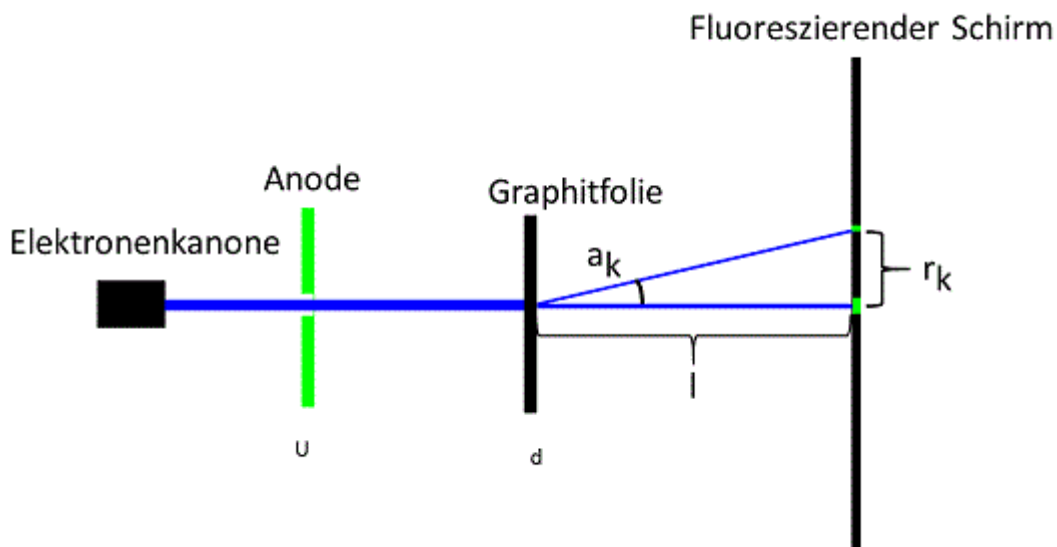


Abb. 6: Aufbau des Beugungs-Experiments mit relevanten Größen [11]

Zusammenfassung: Teilchen besitzen stets eine gewisse, wenn auch sehr kleine Masse, sowie eine Ladung (positiv, negativ oder neutral). Jedes Teilchen bewegt sich mit einer Geschwindigkeit durch den Raum oder schwingt um eine Stelle. Dabei kann es jedoch zu einem bestimmten Zeitpunkt nur an einem bestimmten Ort sein (Ortsbeschränktheit). Wellen hingegen breiten sich im Raum aus und können gleichzeitig an verschiedenen Stellen mit unterschiedlichen Intensitäten wirken. Zudem können sich Wellen durch Überlagerung gegenseitig verstärken, oder sogar auslöschen (Interferenz). Obwohl sich diese Eigenschaften zu widersprechen scheinen, können sie an ein und demselben Objekt beobachtet werden. Hierbei kommt es auf die Versuchs-Bedingungen an: Je nachdem können entweder Wellen- oder Teilchen-Eigenschaften aufgezeigt werden.

Abschluss 1: Das Licht besitzt immer Wellen- und Teilchen-Eigenschaften. Allerdings sind je nach Reaktions-Bedingungen entweder nur die Eigenschaften einer Welle oder nur die Eigenschaften eines Teilchens zu beobachten. Als Lösung dieses Problems wurde der Welle-Teilchen-Dualismus etabliert.

Abschluss 2: Auch Elektronen kann man eine Wellenlänge zuordnen. Diese wird dann als de Broglie-Wellenlänge bezeichnet. Elektronen sind daher Welle und Teilchen zugleich, was das Elektronenbeugungs-Experiment belegt.

Quellen:

1. Von Jasper Olbrich - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=26601557>; Stand: 19.02.2019
2. Peter W. Atkins; Physikalische Chemie; Wiley-VCH Verlag GmbH & CoKGaG; Weinheim; 2013
3. <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/welle-teilchen-dualismus/15525>; Stand: 19.02.2019
4. <http://www.sapereaudepls.de/einzeldisziplinen/quantentheorie/welle-teilchen-dualismus/>; Stand: 19.02.2019 (Quelle verschollen, 18.01.2021)
5. http://www.chemie.de/lexikon/Wasserstoff.html#Physikalische_Eigenschaften; Stand 19.02.2019
6. Welt der kleinsten Teilchen, Doppelspalt-Experiment – Quantenphysik einfach erklärt, 12.10.2009, <https://www.youtube.com/watch?v=3ohjOltaO6Y>, Stand: 19.02.2019
7. Höfling, O. (1985). Die Experimente von Young und Fresnel. In Physik – Lehrbuch für Unterricht und Selbststudium (14. Auflage, S. 646f.), Bonn: Dümmlers Verlag.
8. Höfling, O. (1985). Die Welleneigenschaften der Materie. In Physik – Lehrbuch für Unterricht und Selbststudium (14. Auflage, S. 729ff.), Bonn: Dümmlers Verlag.
9. Höfling, O. (1985). Der Dualismus von Welle und Korpuskel. In Physik – Lehrbuch für Unterricht und Selbststudium (14. Auflage, S. 729ff.), Bonn: Dümmlers Verlag.
10. Atkins, P.W.; de Paula, J. (2008). Beugung von Elektronen. In Kurzlehrbuch Physikalische Chemie (4. Auflage, S.539f.) Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH.
11. <https://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/elektronenbahnen/elektronenbeugung/wellenlaenge/aufbau.php>, Stand: 19.02.2019
12. <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/1569>, Stand: 19.02.2019 (Quelle verschollen, 18.01.2021)